

文章编号: 1001-3806(2005)03-0266-04

海水介质中激光前向散射的空间时间特性分析

闫旭光¹, 彭复员¹, 徐国华², 李旭涛¹

(1. 华中科技大学 电子与信息工程系, 武汉 430074 2 华中科技大学 交通学院, 武汉 430074)

摘要: 针对海水介质及海水中的悬浮颗粒对激光的传输有强烈的吸收和散射作用, 严重影响了激光雷达系统的应用范围这一问题, 对海水光信道(前向散射)的时域、空域特性做了理论分析和计算机模拟, 得出了在接受范围内, 有用信号与噪声在时域、空域上的一系列特性差异, 为减弱前向散射的漫射分量、提高系统的分辨率和信噪比的研究提供了理论依据和实验验证。

关键词: 海洋激光; 海水介质; 前向散射; 空间时间特性; 计算机模拟

中图分类号: TN911.74 **文献标识码:** A

Analysis of temporal and frequency characteristics of fore-scattered laser in ocean channel

YAN Xu-guang¹, PENG Fu-yuan¹, XU Guo-hua², LI Xu-tao

(1. Department of Electronic & Information Engineering HUST, Wuhan 430074, China 2. Traffic Science & Engineering College HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract Currently, light detecting and ranging (LIDAR) systems are widely used in underwater object detecting, ocean remote sensing, etc. However, the seawater and suspended granules do affect the transmission of laser and restrict the application scope of LIDAR. The studies before almost aim at the reducing of back-scattered component. However, the study on fore-scattered component barely appeared on literatures. The temporal and frequency characteristics of fore-scattered component of laser were studied and the theory about how to enhance the system SNR was presented.

Key words laser in seawater; seawater medium; fore-scattered; temporal and frequency characteristics; computer simulation

引 言

近年来, 激光雷达在海洋探测、遥感、监测领域得到了广泛的应用。但海水及海水中的悬浮颗粒对激光的传输有强烈的吸收和散射作用, 海水的后向散射降低了接收信号的信噪比和对比度, 海水的前向散射降低了信号的分辨率, 海水对光的吸收降低了系统的作用距离, 这些因素严重影响了系统的性能和作用距离。针对这些问题, 已做了很多研究以提高系统的性能, 例如, 距离选通是从时间上来抑制后向散射; 同步扫描则是从空间上抑制后向散射^[1]; 对海水后向散射的频域特性进行了分析进而提出用频域滤波的方法来滤除后向散射^[2,3]。这些方法对后向散射的抑制方面都得到了很好的效果。然而, 对于海水前向散射的研究还不多, 一般都做小角度近似^[4]。诚然, 由于海水中激光

散射的前向性, 即散射能量集中在偏标的探测和分析。然而, 随着海水介质混浊度增大和光学厚度增加(有文献报道^[4], 典型的海水水体的渐进距离约是十几个标准散射长度, 在渐进距离以外的区域, 小角度近似失效而将引起较大的误差), 前向散射分量趋于漫散射, 从而很难从中提取有用信息而成为噪声。针对这一问题, 本文中对海水中激光的前向散射分量进行了时域和空域分析, 给出了减弱前向散射的漫射分量、提高信噪比的理论分析和计算机模拟实验验证。

1 理论分析

关于光在海水介质中传输的研究一般有 3 种方法: 分析方法、实验方法和数值模拟(蒙特卡罗)方法。由于多次散射的复杂性, 很难通过分析方法得到扩散与水质参数及水下深度间精确的数学关系式, 即使推导出一些结果也是建立在许多近似假设的基础上的, 不能满足工程设计的需要; 而实验方法无疑是一种最直接和最可靠的方法, 但受到实验条件和实验经费的限制, 不可能对每一种水质、每一个水下深度都进行实验, 而且有些特性还很难甚至无法用实验的方法测量; 而蒙特卡罗方法是一种用计算机模拟真实实验的统计

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60272099); 国家八六三计划资助项目(2002AA401001-4B)

作者简介: 闫旭光(1979), 男, 硕士, 主要从事水下图像处理科研工作。

E-mail: yanhus@sina.com

收稿日期: 2004-04-01; 收到修改稿日期: 2004-08-30

方法,它不需要做过多的近似,对几乎每一种感兴趣的特性都可以进行模拟,并且可以得到相当精确的结果。

2 蒙特卡罗模拟

2.1 算法描述

蒙特卡罗模型通过相应的概率模型和随机数发生器产生的随机数来模拟单个光子在介质中的随机行走过程,包括随机步长和随机行走方向。光子在每一个随机位置会发生散射和吸收作用,这由光子的权重来决定。重复以上行走和作用的过程直到满足某种终止条件而使光子消亡,通过对大量光子的追踪,得到光子在介质中传输行为的统计结果,从而可以计算出需要的模型参数。

光子在随机介质(海水)中的运动过程主要由 3 个参数决定: μ_s (散射系数)、 μ_a (吸收系数)、 g (散射余弦角平均值)。散射系数和吸收系数与单粒子散射截面 σ_s 、吸收截面 σ_a 、散射粒子数密度 n 和吸收粒子数密度 n' 间满足关系 $\mu_s = n\sigma_s$ 和 $\mu_a = n'\sigma_a$ 。吸收长度是光子在介质中被吸收前通过的平均距离。散射平均自由程是两次散射间的平均距离。 g 反映了散射的各向异性程度。总消光系数是散射和吸收系数之和 $\mu_t = \mu_s + \mu_a$ 。

蒙特卡罗方法中光子随机行走模型算法见下。

(1) 作用中光子的随机步长由 Beer's Law 确定:

$$\Delta S = -Ln\xi\mu_t \quad (1)$$

式中, ξ 为 (0, 1) 内均匀分布的随机数。

(2) 每次作用中被吸收的概率 P :

$$P = \frac{\mu_a}{\mu_s + \mu_a} = 1 - \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a} = 1 - a \quad (2)$$

式中, a 是单个粒子的反照率, 权重迭代: $w' = w \times a$ 。

(3) 光子散射方向性与散射相函数分布的余弦平均值 g 有关, 由 Heney-Greenstein 相位函数确定:

$$\cos\theta = \frac{1}{2g} \left\{ 1 + g^2 - \left[\frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\xi} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

式中, θ 是散射方向与初始方向的夹角, ξ 为 (0, 1) 内均匀分布的随机数。

(4) 光子的终止条件: (a) 光子权重的大小来决定, 当光子权重小于某一值时可以认为光子消亡而不再跟踪, 这主要由所考虑的具体问题和探测器的灵敏度来决定; (b) 目标介质的几何限制所决定, 当光子发射到介质外则不再跟踪; (c) 目标介质内部特性所决定, 如存在吸收体, 则当光子撞到吸收体上时, 认为光子消亡而不再跟踪。

2.2 试验设计

由于各个光子之间的相互独立性, 光束在海水

关于 z 轴 (传播方向) 圆对称, 因此只考虑 x, z 二维平面坐标。以入射光束点为原点, 设海水介质为一无限大半平面, 见图 1。光子的状态可由纵向坐标 z 、横向坐标 x 、与 z 轴夹角 θ_z 、与 x 轴夹角 θ_x 、生命权重 w 等 5 个参量来描述。根据实验要求, 在适当位置设置接收器, 跟踪到达接收器各个光子的时间 (光子的时间状态可由其走过的路程、介质的折射率以及介质中的光速来求得) 和空间位置, 做统计分析即可得到需要的关于海水介质的物理参数。

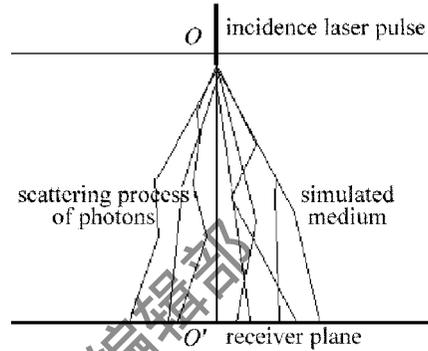


Fig. 1 Sketch of system simulation

如图 1 所示, 一个激光脉冲 (持续时间无限短, 空间尺度无限细) 从 O 点发射, 经过模拟介质的随机散射 (也可包括吸收) 到达接收器平面, O' 为 O 在接收器平面的投影点, O 到 O' 的连线称为光轴。

3 实验结果及分析

3.1 前向散射光斑内的光强分布规律与系统参数的关系

记录到达接收器平面不同位置的光子数, 即可得到前向散射光斑内的光强分布; 分别改变程序中各个系统参数的值, 则可得到前向散射光斑内的光强分布规律与系统参数的关系。模拟结果见图 2 和图 3 (图中横坐标为接收器平面上到 O' 的距离, 单位是 0.2m; 纵坐标为光子数)。

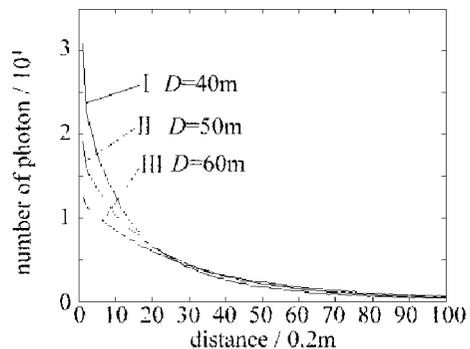


Fig. 2 Relationship between intensity of the forward-scattered and depth ($g = 0.9, \mu_s = 0.09m^{-1}, \mu_a = 0.01m^{-1}$)

从图 2 和图 3 中可以看出, 随着深度和总消光系数 μ_t 的增大, 到达接收器的光子数急剧减少, 光强

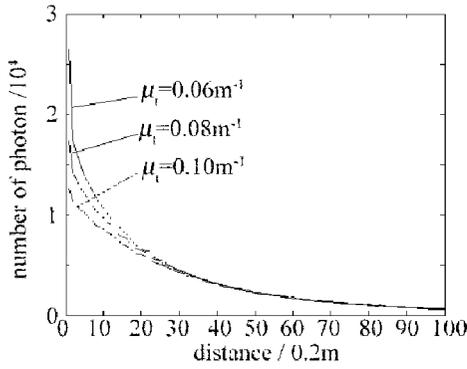


Fig 3 Relationship between intensity of the fore-scattered and extinction coefficient ($g = 0.9$, $D = 60m$, $\mu_s = 0.9\mu_t$)

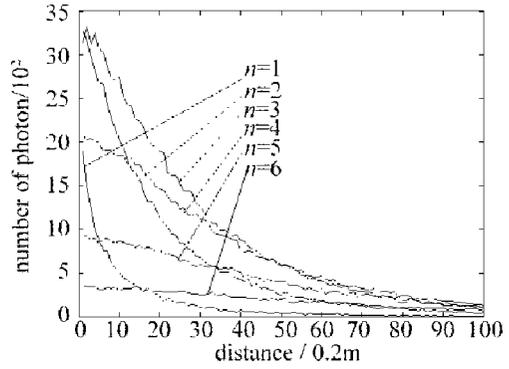


Fig 4 Height of different scattering time in the fore-scattered ($g = 0.9$, $\mu_s = 0.09m^{-1}$, $\mu_a = 0.01m^{-1}$, $D = 60m$)

变化趋于平缓,光斑半径逐渐变大,前向散射光趋于发散。显然在海水光传输中,光学厚度 $\tau = D \times \mu_t$ 才是更本质的参数。在水质较差即总消光系数 μ_t 较大的情况下,系统的作用距离较小。

在蒙特卡罗模拟中可以很方便地记录经过不同散射次数到达接收器的光子,从而获得到达接收器的前向散射光中不同散射次数的分量。模拟结果见图 4 图 5(图中横坐标为接收器平面上到 O' 的距离,单位是

$0.2m$, 纵坐标为光子数; n 为散射次数)。

从图 4 中可以看出,散射次数小的分量随径向距离的增大衰减剧烈;而散射次数大的分量随径向距离的增大衰减较为缓慢。显然可以通过空间滤波即缩小接收器孔径的方法来提高信噪比。事实上经过较少散射次数的光子受介质影响较小,与未散射光子的相关性较大;而那些经过多次散射的光子,因其与未散射光子的相关性较小而成为噪声。

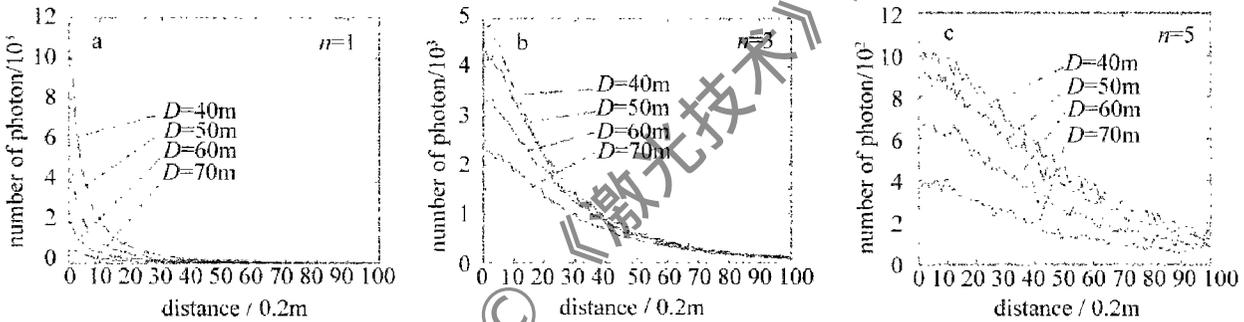


Fig 5 Relationship between height of different scattering time and depth ($g = 0.9$, $\mu_s = 0.09m^{-1}$, $\mu_a = 0.01m^{-1}$)

从图 5 中可以看出,散射次数小的分量随深度的增大衰减剧烈;而散射次数大的分量随深度的增大衰减较为缓慢。可知在较大距离(光学厚度)的条件下,前向散射中多次散射分量将占较大的比重,通过空间滤波即缩小接收器孔径的方法很难改善信噪比,也就是说在大光学厚度条件下很难用空间滤波的方法将不同散射次数的分量分开。

3.2 前向散射的时间(延迟)特性与系统参数的关系
记录到达接收器平面的光子经历的路程(各次随

机步长之和),乘上传输介质的折射率(取 1.8)与真空中光速($3 \times 10^8 m/s$)的比值即可得到光子从发射器到接收器所经历的时间。对大量光子进行统计,可以得出前向散射的时间特性。再分别改变程序中各个系统参数的值,则可得到前向散射时间特性与系统参数的关系。模拟结果见图 6 图 7(横坐标为延迟时间,单位是 $6ns$,纵坐标为光子强度)。

由图 6 可以看出,前向散射时间特性有一个明显的波峰,而且随着光学厚度的增加,波峰会逐渐向后移

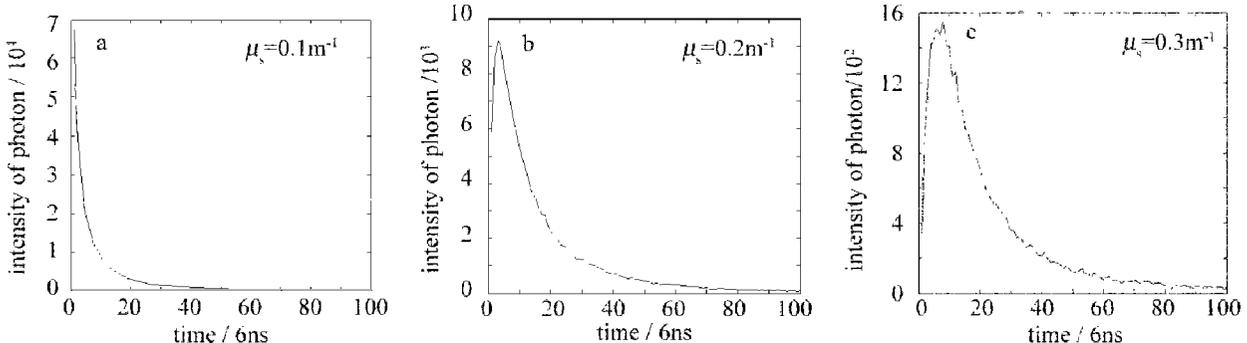


Fig 6 Relationship between temporal characteristics of fore-scattered and scattered coefficient of seawater ($g = 0.9$, $\mu_a = 0.02m^{-1}$, $D = 60m$)

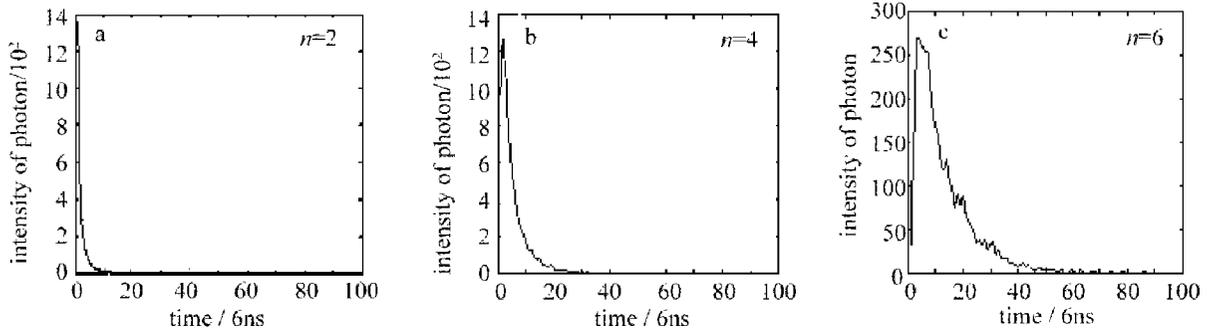


Fig 7 Heft of different scattering time in the temporal characteristics of fore-scattered ($g = 0.9, \mu_s = 0.18m^{-1}, \mu_a = 0.02m^{-1}, D = 60m$)

动,即时间延迟增多。这个现象可由图 7 的结果来解释,图 7 中可以看出,散射次数多的光子在到达接收器之前一般都会经历较长的路程,因此时间延迟较多。而随着光学厚度的增大,多次散射所占的比重将越来越大,那么前向散射的波峰就会逐渐向后移动。

较早到达接收器的光子经历的路程较短,受到介质的影响较小,与未经散射的光子的相关性较强,携带的目标信息较多。而那些延迟较多的光子受到介质的影响较大,很难从中提取出目标的有效信息,从而成为噪声。因此,可以用延迟时间上的差别(时间门)来减弱多次散射的比重从而提高信噪比。时域的时间门在弹道光(未经散射光)到达接收器的时刻开启,延迟一段时间后关闭,可以很大程度上滤除较大时间延迟的多次散射分量。用时间门来滤波必须确切知道弹道光到达的时间即接收器与目标的精确距离,这个要求在很多情况下不可能满足,而且对于一般激光雷达的单站工作方式来说也不可行,因为后向散射时时存在,很难确定时间门的开启时刻。这些都是时域滤波的弊端。考虑到时间域与频率域的对偶性,我们试图探讨频域滤波的可行性。

3.3 前向散射的频域特性

对前向散射的时间特性($g = 0.9, \mu_s = 0.18m^{-1}, \mu_a = 0.02m^{-1},$ 深度 $D = 60m$)做 Haar 小波变换,结果见图 8

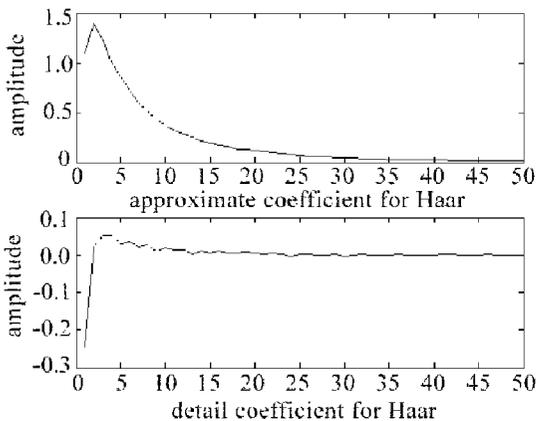


Fig 8 Haar wavelet transform of the temporal characteristics of fore-scattered

从图 8 中可以看出,波形后面拖尾部分(多次散射分量)对应着低频分量;波形前面上升部分(蛇行光)对应着高频分量。经过多次散射的光子会使发射的脉冲波在时域上展宽,在频域上就反应为高频分量的丢失;蛇行光,即经过较少几次散射的光子也会使发射脉冲时域展宽,但一些高频分量还是可以以较小的失真穿过介质;弹道光在通过介质时没有收到介质的影响,因而保留了全部的频率分量。由此可见,用频率滤波的方法是可以滤除一部分多次散射分量以提高系统的信噪比,而且在没有外界噪声的条件下越高的截止频率就能越大程度上地提高系统信噪比。然而外界的噪声总是存在的,因此,在给定系统参数下用什么样的截止频率能够获得最优的信噪比是进一步研究的内容。

4 结 论

以蒙特卡罗模拟为手段,分析了海水介质中光的前向散射的空间、时间特性,验证了空域、时域和频域滤波的可行性。不过,在大的光学厚度下空域滤波将失效;而时域滤波则有其门控时间难以确定的弊端;频域滤波中如何在给定系统参数的条件下确定恰当的截止频率以得到好的信噪比是进一步研究的内容。

参 考 文 献

- [1] JAFFE J S Computer modeling and the design of optical underwater imaging systems[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering 1990 15 (2): 101~111
- [2] MULLEN L J, AMARILDO J C, HERZEFELD V P R *et al* Application of radar technology to aerial lidar systems for enhancement of shallow underwater target detection[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques 1995, 43(9): 2370~2376
- [3] PELLEN F, NITES X, OLWARD P *et al* Determination of seawater cut off frequency by back scattering transfer function measurement[J]. J Phys 2000, D33: 349~354
- [4] DUNLEY S Q Light in the sea[J]. J O S A, 1963 52(1): 214~233